

## ВІДГУК

офіційного опонента **Крючина Андрія Андрійовича**, доктора технічних наук, професора, члена-кореспондента НАН України, заступника директора Інституту проблем реєстрації інформації НАН України на дисертаційну роботу **Яремчук Ірини Ярославівни «Хвилеводний, плазмон-поляритонний і плазмонний резонансні ефекти в мікро- та наноструктурах для сенсорної електроніки»**, представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, спеціальність 01.04.07 - фізика твердого тіла.

### Актуальність теми

Перспективні системи реєстрації інформації, високочутливі сенсори, пристрої трансформації оптичних зображень, близькопольові системи фокусування оптичного випромінювання створюються на базі наноматеріалів, наноструктур, нанокомпозитних системи. На резонансних явищах ґрунтується робота низки сучасних фотонних елементів, таких як різноманітні фільтри, антени, сенсори, сонячні елементи та інше. Використання резонансних мікро- та наноструктур дозволяє значно покращити характеристики оптичних та електронних елементів сенсорних, фотовольтаїчних, фотокаталітичних, біофотонних та інших систем.

В наш час технологія дозволяє створювати мікро- та наноструктури з керованими оптичними властивостями і характерними розмірами порядку декількох десятків та менше нанометрів. Локалізовані плазмони і плазмон-поляритони представляють можуть використовуватися у різних інтегральних датчиках, дія яких базується на тому, що на збудження плазмон-поляритонів і на резонансну частоту локалізованих плазмонів впливає навколишнє середовище, а електромагнітне поле збудженого плазмона, в свою чергу, може взаємодіяти з його оточенням.

Підвищення ефективності датчиків та перетворювачів досягається, головним чином, за рахунок наноструктурування, а не оптимізації хімічного складу матеріалів, а цілеспрямоване керування характеристиками таких систем є неможливим без теоретичного вивчення фізики резонансних явищ, які виникають в процесі взаємодії електромагнітної хвилі з запропонованими структурами та елементами на їх основі. Ключову роль відіграватимуть дослідження та розробка теорії взаємодії лазерного випромінювання з наноструктурами та синтезу на їх основі оптичних елементів із заданими геометричними параметрами і, відповідно, необхідними оптичними властивостями.



Основна гіпотеза роботи полягає у існуванні просторових конструкцій мікро- та наноструктур на основі тонких плівок, наногренок, наночастинок та нанокompозитних матеріалів тобто структур, що містять металеві елементи, а їх функціональність визначається природою металу, розмірами, формою і внутрішньою будовою окремих нановключень, а також особливостями структурування матеріалу. В таких структурах можливі сильні резонансні явища, що приводять до значного підсилення або керованого перерозподілу електромагнітного поля. Математичне моделювання таких явищ для пошуку параметрів структур з максимальним проявом резонансу електромагнітного поля з наступним експериментальним підтвердженням стане підґрунтям для розроблення та виготовлення різноманітних приладів сучасної фотоніки нового типу (сенсорів, сонячних елементів, фотокаталізаторів, енергетичних комірок, наноантен і ін.).

Таким чином, у роботі **Яремчук Ірини Ярославівни** розв'язується актуальна наукова проблема створення фізико-технічних основ вивчення резонансних явищ, які виникають в процесі взаємодії електромагнітної хвилі з мікро- та наноструктурами в умовах оптичної дифракції та плазмонного, плазмон-поляритонного і хвилеводного резонансів та моделювання і оптимізація оптоелектронних елементів на їх основі. Дисертаційна робота відповідає основному напрямку наукової діяльності «Дослідження взаємодії фотонних потоків з гетерогенними системами, розроблення лазерних технологій та фотонних систем» кафедри фотоніки Національного університету «Львівська політехніка». Дисертаційна робота виконана в межах науково-дослідних робіт та грантів: «Резонанс плазмонів та хвилеводних мод в наноструктурах та їх застосування» ДБ/ПЛАЗМА (№ державної реєстрації 0110U001118), «Мікролазери з розподіленим зворотнім зв'язком при виконанні умов Брегга другого порядку на основі хвилеводних структур» ДБ/Мікролазер (№ державної реєстрації 0113U003190), «Архітектоніка мікро- та наноструктур в умовах оптичної дифракції та плазмонного резонансу для потреб сучасної фотоніки» ДБ/ТЕКТОН (№ державної реєстрації 0115U000427), «Моделювання і експериментальна верифікація плазмонно-резонансних наноструктур для ефективного керування електромагнітним випромінюванням широкого спектрального діапазону» ДБ/МЕВ (№ державної реєстрації 0118U000267) в яких автор дисертації була виконавцем; в міжнародних проектах № М/118-2014 «Розробка і створення сенсорних елементів на базі дифракційних нанокompозитних ґраток», (№ державної реєстрації 0114U005151) та № М/124-2015 «Розробка і створення сенсорних елементів на базі дифракційних нанокompозитних ґраток», (№ державної реєстрації 0115U004876) в яких автор дисертації була відповідальним виконавцем, та науково-дослідної роботи «Резонансні процеси трансформації енергії електронного збудження плазмонними наноструктурами в задачах та пристроях фотоніки» ДБ/Фотоніка (№ державної реєстрації 0117U007176); гранта Президента України для підтримки наукових досліджень молодих учених Ф 36/411-2012 «Нанооптичні фільтри на основі металевих елементів» (№ державної



реєстрації 0112U007332); гранта Національного університету «Львівська політехніка» для підтримки наукових досліджень молодих учених № ГЛП-12/5 «Селективні оптичні фільтри на основі металевих елементів», грант Національного університету «Львівська політехніка» (№ державної реєстрації 0112U001202), в яких автор дисертації була науковим керівником.

### **Загальна оцінка роботи**

В роботі проведено детальний аналіз науково-технічних даних, присвячених застосування резонансних мікро-та наноструктур в задачах аналізу і синтезу оптико-електронних систем; сучасного стану методів дослідження та створення нових ефективних технологій фотоніки і оптоелектроніки та можливих методів покращення експлуатаційних характеристик твердо тілних елементів. Розглянуто сучасний стан методів створення та вдосконалення ефективних пристроїв сенсорної електроніки. Проведено огляд основних напрямків застосування резонансних мікро-та наноструктур структури у елементах сенсорних систем, які дозволяють отримати їх високу чутливість. Розглянуто технологічні підходи застосування металевих наночастинок та нанокompозитних матеріалів, оскільки підсилення ближнього поля навколо металевих наноструктур, індуковане опроміненням у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах, дозволяє використовувати їх у прикладних задачах оптоелектроніки.

Вивчено фізику резонансних явищ, які виникають в процесі взаємодії електромагнітної хвилі з мікро- та наноструктурами в умовах оптичної дифракції та плазмонного, плазмон-поляритонного і хвилеводного резонансів та проведено моделювання і оптимізацію оптоелектронних елементів на їх основі для застосування в сенсорній електроніці.

- Показана актуальність задачі розроблення теоретичних моделей взаємодії електромагнітного випромінювання та методики комп'ютерного моделювання ґраткових, призмових та хвилеводних структур, наночастинок та нанооболонки, композитних матеріалів, а також створення числових алгоритмів і конкретних програм розрахунку їх різноманітних фізичних параметрів.

- Визначені умов виникнення резонансних ефектів в композитних мікро- та наноструктурах; вивченні особливості хвилеводного та плазмон-поляритонного резонансів в призмових структурах з метою створення сенсорних елементів на їх основі.

- Визначено умови виникнення хвилеводного, плазмон-поляритонного та плазмонного резонансів в ґраткових мікро- та наноструктурах, та фактори, які впливають на їх спектральні характеристики.

- Розвинуто знання про хвилеводно-резонансні ґраткові структури, як елементи окремого класу сенсорної електроніки, яке полягає у тому, що спектри відбивання характеризуються високим коефіцієнтом відбивання у вузьких спектральних смугах, причому при нормальному падінні наявний



один пік і два піки при падінні променя під кутом. Встановлено, особливі закономірності спектральної чутливості: зміщення другого піку в спектрі відбивання менш чутливе до зміни певних структурних параметрів і більш чутливе до зміни показника заломлення досліджуваного середовища.

### **Основні наукові результати дисертації**

1. Розроблені теоретичні основи фізики резонансних явищ, які виникають в процесі взаємодії електромагнітної хвилі з мікро- та наноструктурами в умовах оптичної дифракції та плазмонного, плазмон-поляритонного і хвилеводного резонансів. Запропоновані методи математичного моделювання таких явищ для пошуку параметрів структур з максимальним проявом резонансу електромагнітного поля для розроблення та виготовлення різноманітних приладів сучасної фотоніки та електроніки. Розроблено математичні моделі взаємодії електромагнітної хвилі з композитними мікро- та наноструктурами для розрахунку їх спектральних характеристик та виявлення умов виникнення резонансних ефектів.

2. Вдосконалено метод зв'язаних хвиль шляхом нового представлення зв'язку між векторами електричних і магнітних полів за допомогою додаткових постійних коефіцієнтів та  $S$ -матриць, які пов'язують напруженості полів між сусідніми шарами ґратки, а також завдяки новому представленню функціональної залежності діелектричної проникності матеріалу періодичної структури у вигляді модифікованого комплексного ряду Фурє.

3. Встановлено характер впливу металевих нановключень з врахуванням їх розміру, форми та концентрації на оптичні та електронні властивості нанокompозитних структур.

4. Визначено оптимальні параметри субмікронних структур, які можуть бути використані при створенні сенсорів, що працюють на основі плазмон-поляритонного резонансу, можуть застосовуватися в раманівській спектроскопії за рахунок виникнення резонансу плазмонів і відповідно значного підсилення поля.

5. Вперше встановлено, що при резонансі локалізованих поверхневих плазмонів в наноструктурах типу масиву періодично розташованих металевих нанодротів, спектральне розташування піків поглинання близькі до резонансних довжин хвиль металевих наночастинок. Такі структури можуть використовуватися як чутливі елементи сенсорної електроніки. Резонансний пік у срібних нанодротах розщеплюється на декілька піків в результаті інтерференції поля падаючої хвилі та розсіяного поля на сусідніх нанодротах за рахунок того, що уявна частина діелектричної проникності срібла суттєво менша ніж уявна частина діелектричної проникності золота. Встановлено, що тангенціальні складові напруженості поля на срібних нанодротах в декілька разів більші ніж поля на нанодротах із золота.

6. Вперше встановлено, що для моделювання оптичних характеристик нанокompозитного матеріалу на основі алмазоподібної вуглецевої плівки з



диспергованими в неї наночастинками срібла серед різноманітних теорій (теорія Мі, теорія Бруггемана, теорія Махвелла-Гарнетта, та ін. ) найбільш придатною є теорія ефективного середовища Максвелла-Гарнетта.

7. Розвинуто знання про хвилеводно-резонансні ґраткові структури, як елементи окремого класу сенсорної електроніки, яке полягає у тому, що спектри відбивання характеризуються високим коефіцієнтом відбивання у вузьких спектральних смугах, причому при нормальному падінні наявний один пік і два піки при падінні променя під кутом. Встановлено, особливі закономірності спектральної чутливості: зміщення другого піку в спектрі відбивання менш чутливе до зміни певних структурних параметрів і більш чутливе до зміни показника заломлення середовища, яке досліджується.

Основні **наукові результати**, що отримані в роботі, **являються новими**.

### **Практичне значення роботи**

Практичне значення отриманих результатів полягає у тому, що дисертантом створена низка технологій, яка може бути використана для виготовлення чутливих елементів сенсорної електроніки :

1. Встановлено умови виникнення локалізованого плазмонного резонансу в металевих наночастинках, нанооболонках та нанокомпозитних матеріалах, а також можливості їх застосування як чутливих елементів сенсорної електроніки. Встановлено, що зміною товщини оболонки металу на діелектричному чи напівпровідниковому ядрі можна налаштувати спектральне розташування піку поверхневого плазмового поглинання в інтервалі довжин хвиль видимої і ближньої інфрачервоної області спектру та оцінено вплив відносної діелектричної проникності оточуючого середовища на оптичні характеристики таких наноструктур. Показано, що для нанокомпозитного матеріалу на основі алмазоподібної вуглецевої плівки з диспергованими в неї наночастинками срібла ефективну діелектричну проникність найкраще описує теорія ефективного середовища Максвелла-Гарнетта. Спектральне положення піку поглинання є більш чутливим до діелектричної проникності алмазоподібної вуглецевої плівки ніж до радіуса наночастинок (радіус наночастинок менший за 25 нм ). Встановлено, визначальний вплив об'ємної концентрації срібла, збільшення електромагнітної взаємодії між наночастинками та зміни діелектричної проникності матриці на позицію піку плазмонного поглинання.

2. Оптимізовано геометричні параметри ґратки на основі арсеніду галію покритої тонким шаром золота та створено на її основі сенсорний елемент. Показано, що позиція піку плазмонного резонансу знаходиться в лінійній залежності від довжини хвилі збудження та зміни періоду ґратки. Теоретичні результати показують, що досліджувана структура є чутливою до зміни показника заломлення у рідких середовищах, ніж у газових середовищах. Теоретичні та експериментальні результати залежності коефіцієнта відбивання від кута падіння лазерного променя є в досить хорошій кореляції.

3. Показано, що прямокутні структури на основі матеріалів



полікарбонат/срібло та срібло/срібло були розраховані та оптимізовані для довжин хвиль збудження 0,532 мкм, 0,633 мкм і 0,785 мкм з метою отримання максимального підсилення сигналів гігантського комбінаційного розсіяння. Показано, що досягнення максимального підсилення певної довжини хвилі збудження можливе лише за заданих комбінацій періоду ґратки, глибини і коефіцієнта заповнення, які відповідають поверхневу плазмон-поляритонному резонансу на поверхні металу. Повністю металеві періодичні структури є більш придатними для ефективного застосування їх в якості підкладок гігантського комбінаційного розсіяння світла, оскільки за допомогою них можна значно більше підсилити електромагнітне поле у порівнянні з метал-діелектричними періодичними мікроструктурами.

4. Дослідження нанооб'єктів у вигляді наночастинок, нанооболонки та нанокompозитних матеріалів дозволило визначити можливості керування піком поглинання поверхневого плазмона чи плазмон-поляритона у видимій та ближній інфрачервоній області спектру. Показано, що відпал нанокompозитного матеріалу спричиняє появу додаткового плазмонного піку і це явище може бути корисним у різних застосуваннях. Зокрема, це може призвести до підсилення комбінаційного розсіяння світла. Двосмуговий плазмонний резонанс може бути використаний також для виготовлення хімічних сенсорів, а звуження ширини плазмонних піків призводить до збільшення роздільної здатності сенсора.

В цілому дисертаційна робота **Яремчук Ірини Ярославівни** містить значний обсяг результатів експериментальних досліджень, які можуть бути використані при створенні сенсорних систем.

#### **Ступінь обґрунтованості і достовірності одержаних наукових результатів**

Ступінь обґрунтованості і достовірності результатів дисертації підтверджується коректністю та адекватністю запропонованих математичних моделей, порівнянням з експериментальними результатами, які отримані методами оптичної та інфрачервоної спектроскопії, еліпсометрії, ЕПР-спектроскопії, поверхневого плазмонного резонансу, АФМ і СЕМ мікроскопії.

Достовірність результатів і положень дисертації підтверджується також їх апробацією та опублікованими науковими працями. За темою дисертації опубліковано 65 наукових праць, зокрема у 9 статтях у наукових фахових виданнях України, у 15 статтях у наукових періодичних виданнях інших держав із напрямку, з якого підготовлена дисертація, включених до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science, 2 розділах у книгах та збірках наукових праць, виданих за кордоном, які включено в наукометричні бази Scopus та Web of Science, 18 статтях в матеріалах конференцій, які індексовані у наукометричних базах Scopus та Web of Science, 21 праці, що опубліковані в збірниках тез доповідей міжнародних та



всеукраїнських конференцій.

Частина опублікованих робіт у іноземних виданнях мають досить високе цитування:

- Ivanov, S., Barylyak, A., Besaha, K., Bund, A., Bobitski, Y., Wojnarowska-Nowak, R., **Yaremchuk I.** & Kus-Liśkiewicz, M. (2016). Synthesis, characterization, and photocatalytic properties of sulfur-and carbon-codoped TiO<sub>2</sub> nanoparticles. *Nanoscale research letters*, 11(1), 140, цитовано у 24 джерелах;
- **Yaremchuk, I.**, Meškinis, Š., Fitio, V., Bobitski, Y., Šlapikas, K., Čiegis, A., Balevičius Z., Selskis A.. & Tamulevičius, S. (2015). Spectroellipsometric characterization and modeling of plasmonic diamond-like carbon nanocomposite films with embedded Ag nanoparticles. *Nanoscale research letters*, 10(1), 157, цитовано в 18 джерелах;
- Meškinis, Š., Čiegis, A., Vasiliauskas, A., Šlapikas, K., Gudaitis, R., **Yaremchuk, I.**, V. Fitio, Ya. Bobitski & Tamulevičius, S. (2016). Annealing effects on structure and optical properties of diamond-like carbon films containing silver, *Nanoscale research letters*, 11(1), 146, цитовано в 18 джерелах;
- Bulavinets, T., **Yaremchuk, I.**, & Bobitski, Y. (2016). Modeling Optical Characteristics of Multilayer Nanoparticles of Different Sizes for Applications in Biomedicine. In *Nanophysics, Nanophotonics, Surface Studies, and Applications* (pp. 101-115). Springer, цитовано в 16 джерелах;
- **Yaremchuk, I.**, Tamulevičius, T., Fitio, V., Gražulevičiūtė, I., Bobitski, Y., & Tamulevičius, S. (2013). Guide-mode resonance characteristics of periodic structure on base of diamond-like carbon film. *Optics Communications*, 301, 1-6. цитовано в 15 джерелах.

Загальна кількість цитувань наукових публікацій **Яремчук Ірини Ярославівни** становить 157, h- індекс- 7. (Станом на 10 жовтня 2018)

Наукові положення, результати та висновки дисертації обґрунтовані в достатній мірі та представляються достовірними.

### Автореферат

Зміст автореферату відповідає основним положенням дисертаційної роботи. Аналіз реферату кандидатської дисертації Яремчук Ірини Ярославівни ("Моделювання нерівнотовщинних багаточарових структур для селективних оптичних фільтрів" захищена в Інституті фізики напівпровідників ім. В.Є.Лашкарьова НАН України у 2008 році) показав, що результати кандидатської дисертації не входять до результатів докторської дисертації.

### Оформлення роботи

Дисертаційна робота в цілому оформлена із додержанням сучасних вимог до звітних документів. У роботі є незначні неточності у оформленні, а саме: На деяких графіках криві не позначені, що створює труднощі для правильного сприйняття графіків. Бажано, щоб у підписах до рисунків була інформація про параметри структури, яка розраховується.



## Недоліки і зауваження по роботі

1. Дисертаційна робота представлена на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, тому необхідно було чітко визначити науково-технічну проблему, яка розв'язана і не обмежувати мету роботи тільки "вивчення резонансних явищ, які виникають в процесі взаємодії електромагнітної хвилі з мікро- та наноструктурами ...".

2. В роботі не всюди чітко виділено оригінальні результати, отримані автором дисертації, від уже відомих результатів, отриманих іншими дослідниками.

3. Доцільно було більше уваги приділити аналізу граничних значень характеристик і в першу чергу чутливості сенсорів, які можуть бути створені на базі запропонованих технологій.

4. В авторефераті більше уваги необхідно було приділити опису характеристик методів, з використанням яких були отримані експериментальні дані, не обмежуватися висловлюванням що експериментальні дані одержані з використанням стандартних методик та сучасних методів досліджень.

5. Відсутні одноосібні публікації автора дисертаційної роботи, крім одних тез доповіді на конференції молодих вчених **Yaremchuk I.** (2012, October) Guided-mode resonant grating filters. *Proc. 13<sup>th</sup> International Young Scientists Conference Optics and High Technology Material Science SPO 2012*, Kyiv, Ukraine (pp. 261) (*Моделювання спектральних характеристик фільтра на основі ґратки*)

6. У роботі використовуються неконкретні висловлювання типу "оптичні застосування", "більше підсилити" , "екстраординарні характеристики".

7. У дисертаційній роботі та авторефераті використовуються емоційні висловлювання , які не дозволяють оцінити рівень досягнутих результатів.

8. На деяких графіках криві не позначені, що створює труднощі для правильного сприйняття графіків. Бажано, щоб у підписах до рисунків була інформація про параметри структури, яка розраховується.

Вважаю, що вказані недоліки не впливають на якість дисертаційної роботи в цілому, і принципово не знижують основні позитивні риси роботи, достовірність результатів, їх наукову та практичну цінність.

Дисертація **Яремчук Ірини Ярославівни «Хвилеводний, плазмон-поляритонний і плазмонний резонансні ефекти в мікро- та наноструктурах для сенсорної електроніки»** являється науковою працею, виконаною автором на достатньому кваліфікаційному рівні.

## Висновки

За ознаками наукової новизни, актуальністю тематики, обґрунтованістю проведених досліджень та їх повнотою, дисертаційну



роботу варто вважати закінченим науковим дослідженням, що відповідає усім вимогам щодо докторських дисертацій (пп. 9, 10 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника»). Здобувач **Яремчук Ірина Ярославівна** заслуговує на присудження їй наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.04.07 - фізика твердого тіла.

**Офіційний опонент,  
заступник директора  
Інституту проблем реєстрації інформації  
НАН України, доктор технічних наук,  
професор, член-кореспондент  
НАН України**

**Крючин А.А.**

«06» \_\_\_\_\_ 11 \_\_\_\_\_ 2018 р.

Підпис Крючина А.А. засвідчую



*(Крючин А.А.)*